



IRANIAN FOUNDRYMEN'S
SOCIETY

Founding Research Journal

Effect of Austempering Time and Temperature on the Microstructure and Hardness of Bainitic Silicon Steel

Shahram Kheirandish ^{1*}, Seyed Mohammad Ali Boutorabi ¹ Ashkan Yazdi²

1. Professor, School of Metallurgy and Materials Engineering, Iran University of Science and Technology

2. M.Sc. Student, School of Metallurgy and Materials Engineering, Iran University of Science and Technology.

Received 20 November 2017
Accepted 21 January 2018

Abstract:

In this research, the effect of austempering heat treatment time and temperature on the mechanical properties and microstructure of high silicon steel were investigated. The melting process of this alloy was carried out in an induction furnace with the capacity of 20 kg followed by casting in a Y-block mold cavity. After cutting, the samples were austenitized for 2 hours at 1150°C and austempered at 250 and 300°C temperatures for 2 to 72 hours. The achieved microstructure showed nanometer layers of bainitic-ferrite, and retained-austenite between them. Increasing the austempering time led to the increment of the amount of bainitic-ferrite. The amount of bainitic-ferrite in samples, austempered at 250°C, was 84% and in the maximum state was about 91%. A maximum hardness value of 611 HV was obtained in samples austempered at 250°C for 72 hours.

Keywords:

Superbainite,
Austempering,
Silicon steel,
Bainitic-ferrite.

Journal homepage: www.foundingjournal.ir

Please cite this article using:

Kheirandish Sh., Boutorabi S.M.A., Yazdi A., Effect of Austempering Time and Temperature on the Microstructure and Hardness of Bainitic Silicon Steel, in Persian, Founding Research Journal, 2017, 2(1) 79-87.
DOI: 10.22034/FRJ.2018.106311.1010

* Corresponding Author:

Shahram Kheirandish, Professor

Address: School of Metallurgy and Materials Engineering, Iran University of Science and Technology,
P.O. Box 16846-13114, Narmak, Tehran, Iran. Tel/Fax: +98 21 77459151.

E-mail: kheirandish@iust.ac.ir



پژوهش‌نامه ریخته‌گری

تأثیر دما و زمان عملیات آستمپرینگ بر ریزساختار و سختی فولاد بینیتی سیلیسیم‌دار

شهرام خیراندیش^{۱*}، سید محمدعلی بوتراپی^۱، اشکان یزدی^۲

۱- استاد، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، دانشگاه علم و صنعت ایران (نویسنده مسئول: kheirandish@iust.ac.ir)

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، دانشگاه علم و صنعت ایران

چکیده:

دریافت: ۱۳۹۶/۰۸/۲۹

پذیرش: ۱۳۹۶/۱۱/۰۱

در این تحقیق، تأثیر زمان و دمای عملیات حرارتی آستمپرینگ بر ریزساختار و خواص مکانیکی فولاد پرسلیسیم مورد بررسی قرار گرفت. آلیاژ مذکور در کوره القایی فرکانس متوسط با ظرفیت ۲۰ کیلوگرم و در قالب وای بلوک ریخته‌گری شد. قطعات پس از برش به مدت ۲ ساعت در دمای ۱۱۵۰ درجه سانتیگراد آستنیته شده و در دو دمای ۲۵۰ و ۳۰۰ درجه سانتیگراد و در پنج زمان مختلف بین ۲ تا ۷۲ ساعت تحت عملیات حرارتی آستمپرینگ قرار گرفت. مطالعات ریزساختاری توسط میکروسکوپ الکترونی گسیل میدان و میکروسکوپ نوری بررسی شد. نتایج ساختاری بدست آمده نشان‌دهنده وجود لایه‌های فریت بینیتی نانومتری و آستنیت باقی‌مانده بین آن‌ها بود. همچنین با افزایش زمان عملیات آستمپرینگ، به میزان فریت بینیتی اضافه شد. میزان فریت بینیتی در نمونه‌ی آستمپر شده در ۲۵۰ درجه سانتیگراد برابر ۸۴ درصد بود و در بیشترین حالت به حدود ۹۱ درصد رسید. بیشترین سختی در این دما و زمان ۷۲ ساعت، برابر ۶۱۱ ویکرز بود.

واژه‌های کلیدی:

سوپربینیت،

آستمپرینگ،

فولاد سیلیسیم‌دار،

فریت بینیتی

۱- مقدمه

به‌تازگی، روش نوآورانه‌ای بر اساس تئوری استحاله فازی، طراحی و با موفقیت اعمال شده است که به طراحی فولاد نانو ساختار استحکام بالا و مقرون به‌صرفه، بدون استفاده از تغییر شکل، عملیات حرارتی سریع و یا ماشین‌کاری انجام می‌شود [۱]. همچنین به دلیل گران بودن عناصر آلیاژی مورد استفاده برای تولید فولادهای نانو ساختار، محققان تمرکز خود را روی تحقیق بر فولادهای ارزان قیمت گذاشته‌اند [۲، ۳].

فولادهای بینیتی در جهت برآوردن خواسته روزافزون مواد پیشرفته و تحقق تقاضای فراوان برای بالا بودن توام استحکام و چقرمگی در زمینه‌هایی چون صنایع خودرو و راه آهن توسعه یافته‌اند. خواص مکانیکی خوب این فولاد ناشی از ریزساختار خاص آن است که متشکل از صفحات ریز فریت بینیتی بدون کاربید و فیلم‌های نازک آستنیت باقیمانده غنی از کربن است [۴].

تحقیقات نشان می‌دهد [۵، ۶] که سیلیسیم، حلالیت بسیار کمی در سمنتیت دارد و رشد آن را تا حد زیادی به تعویق می‌اندازد. از این‌رو، افزودن سیلیسیم نقش کلیدی در جلوگیری از رسوب سمنتیت ترد و شکننده در طول انجام تحول دارد و در این حالت یک ساختار بینیتی بدون کاربید تولید شده که در نتیجه آن چقرمگی فولاد بهبود می‌یابد. بر این اساس، تلاش‌هایی در طراحی فولاد آلیاژی بینیتی کربن‌متوسط تا کربن‌بالا، توسط آلیاژسازی با سیلیسیم، انجام شده است [۵، ۶]. بنابراین، طراحی فولادهای کم‌کربن بینیتی با افزودن عناصر آلیاژی سیلیسیم، منگنز، کروم و یا نیکل نیز انجام می‌شود که در آنها، ریزساختار مطلوب با ترکیب خوبی از استحکام و انعطاف‌پذیری بدست می‌آید. به علاوه، آلومینیم دارای عملکرد مشابه با سیلیسیم در جلوگیری از رسوب سمنتیت است که این پدیده در فولادهای TRIP^۱ مشاهده می‌شود [۴].

¹ Transformation induced plasticity

نسل جدیدی از فولادها طراحی شده است که استحاله در دمای پایین (350°C - 200°C)، سبب ایجاد یک ساختار در مقیاس نانو می شود که به عنوان نانوبین^۳ شناخته شده اند. این ریزساختار شامل بلورهای بلند و باریک فریت است که دارای مقیاس خوبی در مقایسه با نانولوله های کربنی ($20-40$ نانومتر) هستند. نانوبین ها بالاترین ترکیب استحکام/چقرمگی ($40\text{MPa}/\sqrt{\text{m}}$ / $2/5\text{GPa}$) را ارائه می دهند که تا به حال در فولادهای بینیتی ثبت شده است. این آلیاژها خواص مکانیکی بهتری نسبت به فولاد کم آلیاژ مارتنزیتی آب دیده و بازگشت داده شده نشان داده اند و با خواص بحرانی فولادهای مارایجینگ^۴، که حداقل 30 برابر گران ترند، مطابقت دارند. این خواص عالی به طور عمده یک نتیجه از تشکیل صفحات فریت بینیتی، با تنها چند نانومتر ضخامت، بدون استفاده از تغییر شکل شدید، ماشین کاری و یا سرد کردن سریع^۵ هستند. این فولاد نانو ساختار جدید دارای پتانسیل قابل توجهی در صنایع حمل و نقل، ساخت و ساز و همچنین برنامه های کاربردی صنایع دفاعی است [۱۱].

هدف از انجام این تحقیق بررسی تاثیر زمان و دمای عملیات حرارتی آستمپرینگ بر خواص مکانیکی و ریزساختار فولاد سیلیسیم دار بود.

۲- مواد و روش تحقیق

ترکیب شیمیایی آلیاژ ریختگی به کمک اسپکتروفوتومتر شرکت Spectrolab بدست آمد و در جدول (۱) نشان داده شده است. همچنین در شکل (۱)، نمودار TTT آلیاژ مورد تحقیق به کمک مدل ترمودینامیکی MUCG83 ارائه شده توسط بادشیا [۱۲] آمده است.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی آلیاژ ریخته شده (درصد وزنی)

Fe	C	Si	Cr	Mn	Mo	Co	P	S
بقیه	۰/۴	۳/۲	۰/۹۶	۰/۷۸	۰/۲۸	۰/۷	۰/۰۳۴	۰/۰۳۶

از جمله مشخصه های استحاله بینیتی که باعث مشکل شدن بررسی آن شده مکانیزم دوگانه آن است. به این صورت که دگرگونی بینیت از برخی جهت ها شبیه به دگرگونی پرلیتی و از برخی جنبه ها شبیه به دگرگونی مارتنزیتی است. مانند پرلیت، محصول دگرگونی بینیتی مخلوطی از دو فاز فریت و سمنتیت است. بنابراین، دگرگونی بینیتی نیاز به تغییر ترکیب شیمیایی دارد و در نتیجه برای انجام آن نیاز به نفوذ کربن است. پس دگرگونی بینیتی از دگرگونی مارتنزیتی کاملاً متمایز می شود. تغییر ترکیب شیمیایی که در ضمن دگرگونی بینیتی انجام می شود شامل عناصر آلیاژی جاننشینی احتمالی موجود در فولادها نیست. به عبارت دیگر، توزیع این عناصر در ضمن تشکیل بینیت تغییر نمی کند [۷]. بنابراین، می توان گفت که درصد عناصر آلیاژی یاد شده در فازهای فریت و سمنتیت ثابت و برابر ترکیب شیمیایی اولیه آستنیت است [۸].

فریت موجود در ورقه های بینیت احتمالاً در محل هایی از شبکه جوانه می زند که، درصد کربن آن در اثر نوسانات حرارتی، کاهش یافته است. یعنی در هر لحظه محل هایی در شبکه وجود دارد که درصد کربن آن ها به اندازه کافی از حد متوسط کمتر است. علت این که فرض می شود شروع تشکیل بینیت با بوجود آمدن فریت همراه است، این است که با کاهش درصد کربن دمای شروع مارتنزیت افزایش می یابد. بنابراین در گستره ی دمایی مربوط به تشکیل بینیت، مارتنزیت کم کربن مستقیماً از آستنیت بوجود می آید. بنابراین فرض شده است که جوانه های اولیه بینیت در حقیقت همان بلورهای بسیار ریز مارتنزیت کم کربن (یا همان فریت) هستند [۹، ۱۰].

بادشیا^۱ و کابایرو^۲ [۸] تحقیقات وسیعی را برای اصلاح و بهبود خواص بینیت انجام دادند. آن ها کشف کردند که هیچ حد پایینی از درجه حرارت برای تولید بینیت (بالای Ms) وجود ندارد. با عملیات حرارتی فولاد در دمای حدود 200°C به مدت 10 روز یا بیشتر، سوپر بینیت حاصل می شود. همچنین با اضافه کردن عناصری مانند سیلیسیم، کبالت و آلومینیم می توان از تشکیل کاربیدهای مضر ترکزا جلوگیری کرد که این در واقع بهبود خواص چقرمگی ناشی از تولید ساختار عاری از کاربید است.

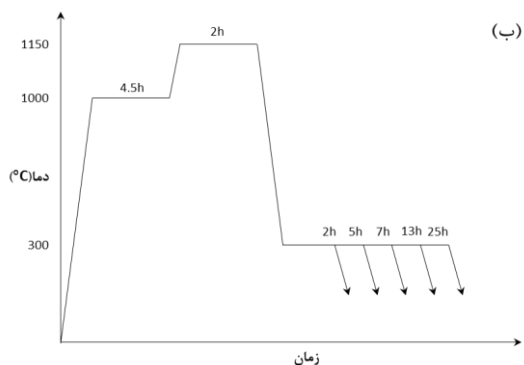
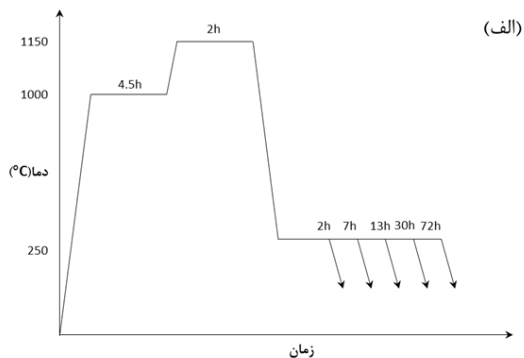
³ Nanobain

⁴ Maraging

⁵ Quench

¹ Bhadeshia

² Caballero

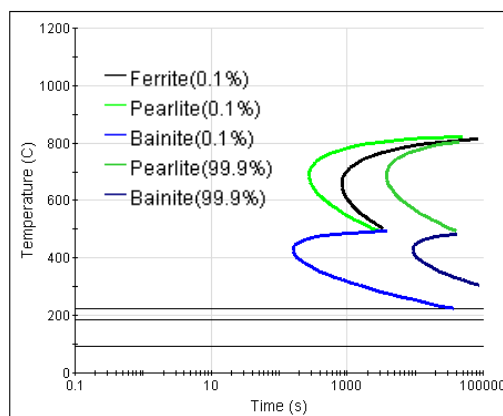


شکل ۳- چرخه‌ی عملیات حرارتی آستمپرینگ در الف) دمای 250°C و ب) دمای 300°C و در زمان‌های مختلف.

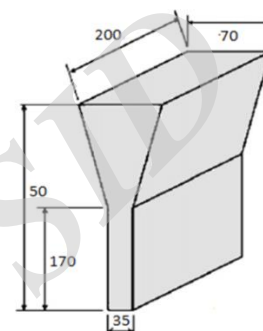
به منظور عملیات حرارتی آستمپرینگ، نمونه‌های بریده شده به مدت ۲ ساعت در دمای $1150 \pm 6^{\circ}\text{C}$ آستنیت شده‌اند و در دو دمای 250°C و 300°C طی ۵ زمان مختلف تحت عملیات آستمپرینگ قرار گرفتند. شکل (۳)، چرخه‌ی عملیات حرارتی انجام شده بر روی نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

از همه‌ی نمونه‌ها به کمک دستگاه برش با تیغه‌ی برش یک قسمت برای متالوگرافی جداسازی شد و تحت مانت گرم قرار گرفت. برای بررسی ریزساختاری نمونه‌ها، ابتدا سنباده‌زنی از شماره‌ی ۲۴۰ تا ۲۵۰۰ انجام شد و پس از آن با پودر آلومینای $1/5\mu\text{m}$ پولیش شد، سپس نمونه‌ها در محلول پیکرال حکاکی شدند. بررسی ریزساختاری با میکروسکوپ نوری مدل Huvitz HR3-TRF-P و از بزرگ‌نمایی ۵۰ تا ۱۰۰۰ برابر انجام شد. میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدان مورد استفاده، Tescan Mira3 با ولتاژ 15kV بود.

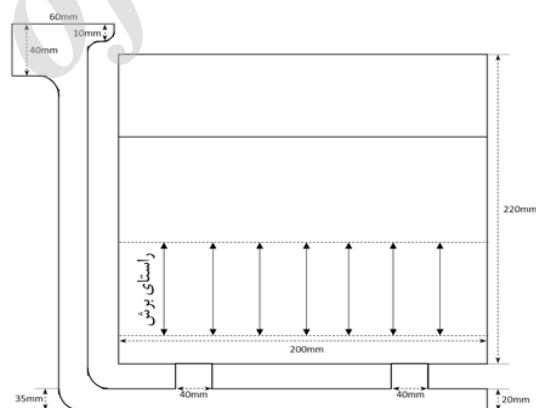
برای تعیین مقدار آستنیت باقی‌مانده، شناسایی فازها و تعیین پارامتر شبکه، سه نمونه از هر دما، تحت آنالیز XRD قرار گرفت. از پرتوی $K\alpha$ مس با طول موج $1/54\text{\AA}$ استفاده شد. ولتاژ دستگاه 40kV و جریان آن 30mA بود. همچنین بازه‌ی تغییرات زاویه‌ی 2θ بین ۱۰ الی ۹۰ درجه انتخاب



شکل ۱- نمودار TTT آلیاژ مورد تحقیق [۱۲].



(الف)



(ب)

شکل ۲- الف) نقشه Y-block و ب) سیستم راهگاهی آن (ابعاد به mm آورده شده است).

مدل استفاده شده برای ریخته‌گری این آلیاژ Y-Block بود که شماتیک و ابعاد آن در شکل (۲) قابل مشاهده است. به منظور یکنواخت کردن ساختار، نمونه‌ها تحت عملیات حرارتی همگن‌سازی قرار گرفتند. دمای Ac_1 و Ac_3 طبق رابطه‌های ارائه شده توسط اندرو [۱۳] و بر حسب درصد وزنی عناصر محاسبه می‌شوند:

$$Ac_1 = 723 - 20.7\text{Mn} - 16.9\text{Ni} + 16.9\text{Cr} + 29.1\text{Si} \quad (1)$$

$$Ac_3 = 910 - 203\sqrt{\text{C}} - 15.2\text{Ni} + 44.7\text{Si} + 104\text{V} + 31.5\text{Mo} \quad (2)$$

به‌طور کلی ساختار درشت شده است. نسبت ابعاد (ضخامت:طول) بسته‌ها با کاهش درجه حرارت استحاله آستمپرینگ کاهش می‌یابد و این مقدار در فولاد های کم آلیاژ به عناصر جانشینی حساس نیست [۱۵]. روند کلی این است که واحدهای فرعی^۱ با افزایش دما افزایش می‌یابند، در حالی که تعداد این واحدها در هر شاخه با افزایش دمای آستمپرینگ کاهش می‌یابد. روندهای مشابهی برای تحولات مارتنزیتی نیز دیده شده است [۸]. [۱۵]. با افزایش دمای دگرگونی ضخامت صفحات فریت بینیتی زیاد می‌شود [۱۶]. سین و بادشیا [۱۵] نشان دادند که اثر استحکام تسلیم آستنیت بر ضخامت فریت بینیتی بیشتر از نیروی محرکه است. آستنیت پراستحکام‌تر مقاومت بیشتری در مقابل حرکت فصل مشترک فریت/آستنیت دارد و باعث ریزتر شدن ساختار و نازک شدن صفحات فریت بینیتی می‌شود. استحکام آستنیت به کمک رابطه‌ی زیر محاسبه شده و نتایج آن در جدول (۲) موجود است [۱۵].

$$\sigma_{ys}^T = (1 - 0.26 \times 10^{-2} T_r + 0.47 \times 10^{-5} T_r^2 - 0.326 \times 10^{-8} T_r^3) \times 15.4 \times (4.4 + 23 W_C + 1.3 W_{Si} + 0.24 W_{Cr} + 0.94 W_{Mn} + 32 W_N) \quad (3)$$

مناطق سفید رنگ اطراف مرزدانه همان آستنیت اولیه هستند که به دلیل جدایش به هنگام انجماد و یکنواخت نشدن ساختار بعد از عملیات همگن کردن بدون تغییر باقی مانده و دچار تغییر حالت نشده‌اند. البته میزان این آستنیت در مرزدانه با توجه به دمای عملیات حرارتی متفاوت بوده و با افزایش دمای عملیات آستمپرینگ از میزان آن کم می‌شود. دلیل این امر این‌گونه توجیه می‌شود که با افزایش دمای دگرگونی، استحکام آستنیت باقی‌مانده کمتر شده و در نتیجه میزان بیشتری از این آستنیت دچار تغییر می‌شود [۱۵].

جدول ۲- استحکام تسلیم محاسبه شده از رابطه ۳ برای آستنیت در دماهای مختلف

دمای دگرگونی (°C)	۲۵۰	۳۰۰
استحکام تسلیم آستنیت (MPa)	۱۳۰	۱۲۰

شد. الگوهای بدست آمده از آنالیز XRD با نرم‌افزار Xpert HighScore مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

برای انجام آزمایش سختی‌سنجی از نمونه‌های عملیات حرارتی شده، یک نمونه به ابعاد $15 \times 15 \times 3 \text{ mm}^3$ جداسازی شد و نمونه‌ها تحت نیروی 30 kg و فرورونده‌ی هرم الماسی در روش ویکرز با دستگاه Testor 2RC مورد آزمایش سختی قرار گرفت. برای هر نمونه ۴ تا ۵ نقطه‌ی مورد آزمایش قرار گرفت.

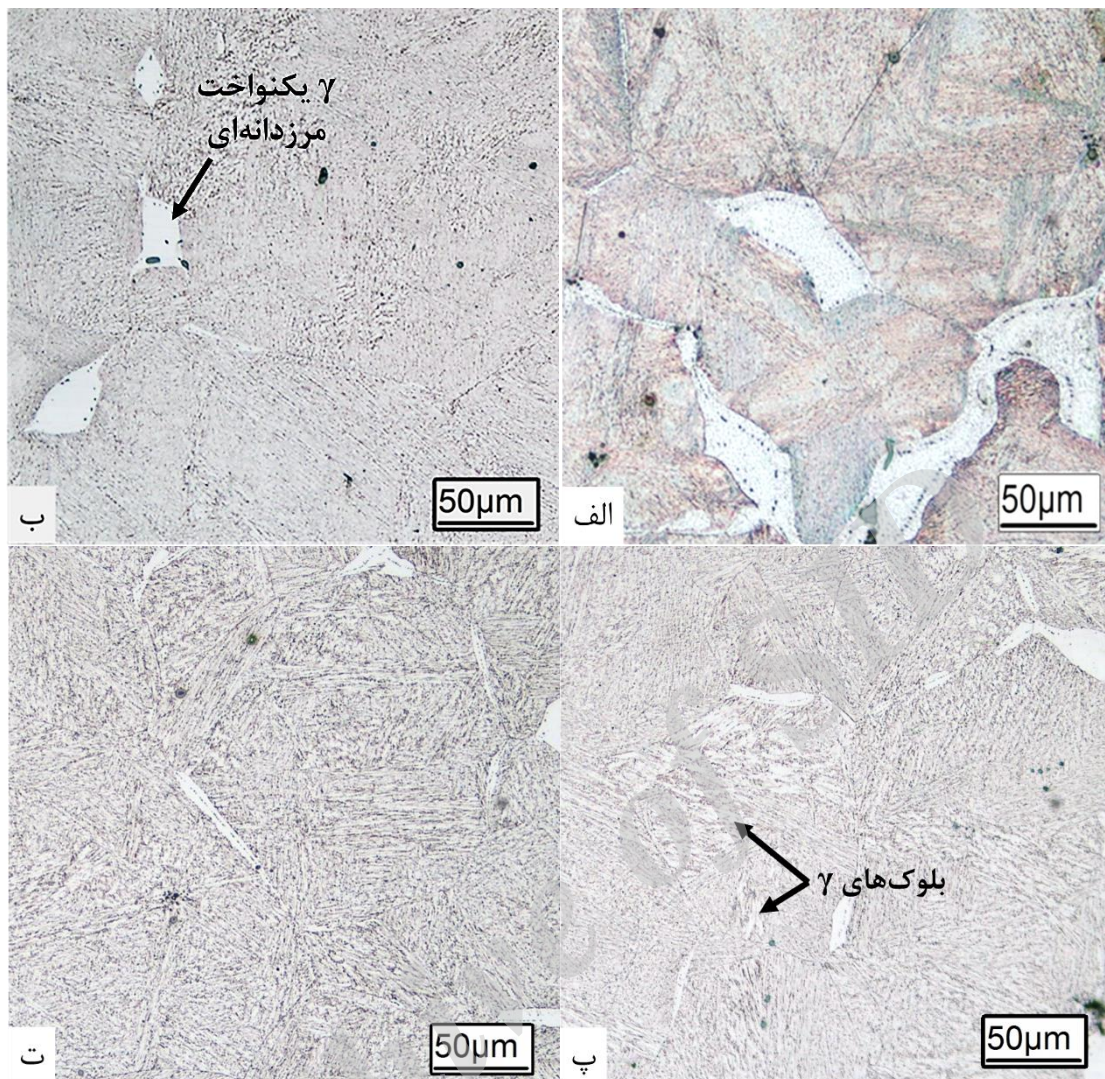
۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی ریزساختاری

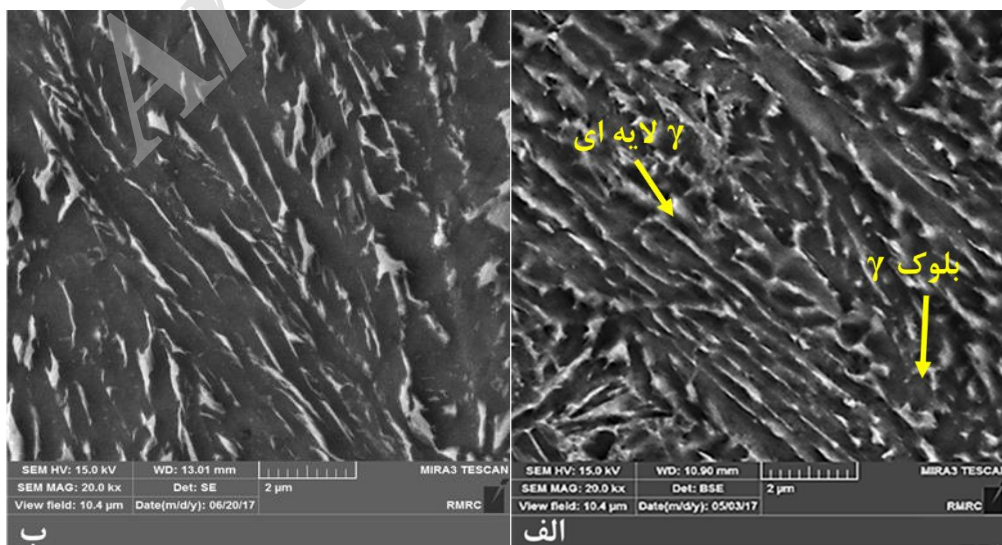
شکل (۴)، تصاویر مربوط به نمونه‌های آستمپر شده در دمای 250°C و 300°C و دو زمان مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل پیدا است، آستنیت باقی‌مانده به دو صورت بلوکی و فیلم‌های لایه‌ای ریز و درشت وجود دارد. برای بهتر مشخص کردن این آستنیت‌ها به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدان تصاویر با بزرگ‌نمایی و وضوح بالاتر گرفته شد که در شکل ۵-الف قابل مشاهده و با پیکان مشخص شده است. همان‌طور که از شکل (۴) پیدا است با افزایش زمان عملیات حرارتی از ۲ تا ۱۳ ساعت در دمای مشخص میزان فریت بینیتی (مناطق تیره‌تر) بیشتر شده و در واقع مقدار بیشتری از آستنیت زمینه دچار دگرگونی شده است. از آنجایی که دگرگونی بینیتی یک دگرگونی وابسته به زمان است با گذشت زمان مقدار بیشتری از فاز محصول تولید می‌شود [۱]. همچنین از نظر ترمودینامیکی بیشترین مقدار فاز محصول که می‌تواند در یک دمای خاص تشکیل شود با کاهش دمای دگرگونی افزایش می‌یابد [۱۴]. با دقت در شکل (۴-ب) و (۴-ت) مشخص می‌شود که مقدار فاز محصول یعنی فریت بینیتی در زمان برابر ۱۳ ساعت در دمای پایین‌تر، بیشتر بوده است.

شکل ۵، تصاویر SEM مربوط به نمونه‌های آستمپر شده در دو دمای 250°C و 300°C به خوبی این مسئله را نشان می‌دهد. علت این امر در وابستگی شدید سرعت جوانه‌زنی به دما نهفته است، به‌گونه‌ای که با کاهش دما، سرعت جوانه‌زنی فریت بینیتی افزایش یافته، لذا آستنیت بیشتری مصرف شده و صفحات فریتی بیشتری تشکیل می‌شود [۱۵]. علاوه بر این با افزایش دمای آستمپرینگ مشاهده می‌شود که ضخامت صفحات فریت بینیتی بیشتر شده و

¹ Sub-units



شکل ۴- تصاویر میکروسکوپ نوری نمونه‌های آستنیت‌شده در 1150°C و آستمپر شده در دمای 250°C و زمان‌های الف) ۲ و ب) ۱۳ ساعت و دمای 300°C و زمان‌های پ) ۲ و ت) ۱۳ ساعت شامل لایه‌های فریت بینیتی، آستنیت باقیمانده به دو صورت بلوکی و لایه‌ای و آستنیت یکنواخت مرزدانه‌ای

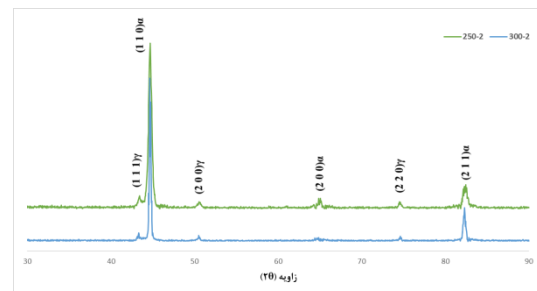


شکل ۵- تصاویر SEM از ریزساختار نمونه‌های آستمپر شده در دماهای: الف) 250°C و ب) 300°C

۳-۲- تحلیل الگوهای اشعه X

شکل (۶)، الگوی پراش اشعه X نمونه‌های آستمپر شده در دماهای ۲۵۰ و ۳۰۰ °C در زمان ۲ ساعت را نشان می‌دهد. همان طور که در بخش ۳-۱ اشاره شد، با کاهش دمای عملیات در زمان‌های یکسان میزان فریت بینیتی بیشتری تشکیل می‌شود که دلیل آن هم افزایش نیروی محرکه‌ی جوانه‌زنی بینیت با کاهش دما است. با محاسبات انجام شده روی نتایج حاصل از الگوی نمونه‌ی ۲۵۰ °C، میزان فریت بینیتی برابر با ۸۴ درصد شد که در مقایسه با نمونه‌ی ۳۰۰ °C حدوداً ۳ درصد بیشتر است. این موضوع پیش‌تر نیز از عکس‌های میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی گسیل میدانی ثابت شده بود.

در جدول (۳)، تغییرات درصد کربن آستنیت باقی‌مانده با دما نشان داده شده است. مشخص است که با افزایش دمای آستمپرینگ در زمان مشخص (۲ ساعت) میزان کربن آستنیت افزایش یافت. دلیل این افزایش، بیشتر شدن ضریب نفوذ کربن با دما است. پس از تشکیل فریت بینیتی از آنجایی که کربن به مقدار بسیار کمی در شبکه‌ی آن وجود دارد؛ کربن پس‌زده شده و میزان آن در شبکه آستنیت افزایش می‌یابد. این اثر زمانی بیشتر می‌شود که دمای دگرگونی بیشتر است.



شکل ۶- نتایج الگوی پراش اشعه ایکس (XRD) نمونه‌های آستمپر شده در دمای ۲ ساعت و دماهای ۲۵۰ و ۳۰۰ °C.

جدول ۳- اطلاعات استخراج شده از الگوی XRD

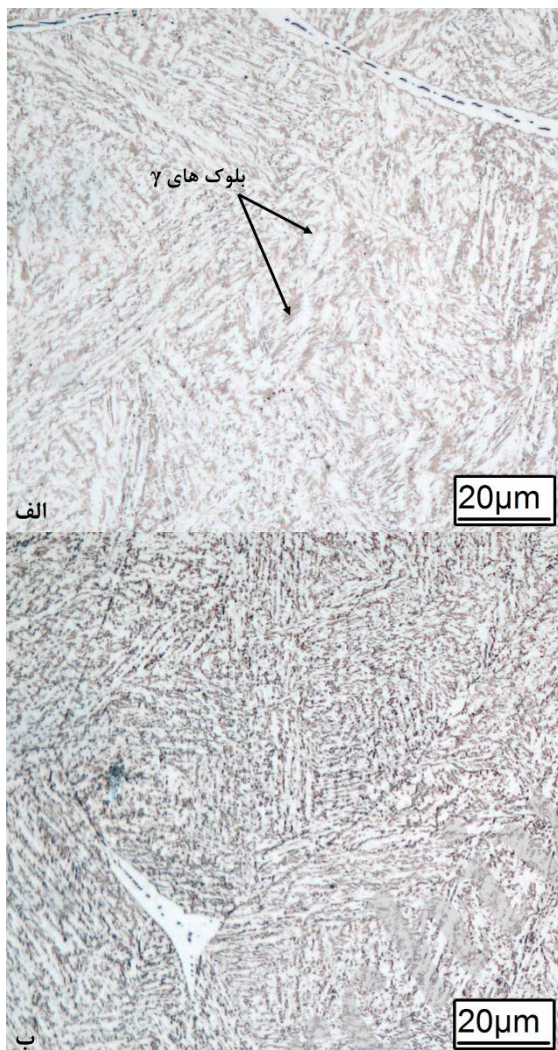
آستنیت باقی‌مانده			دمای آستمپرینگ (°C)
درصد	پارامتر شبکه‌ی (Å)	درصد کربن	
۱۶/۱	۳/۵۹۶	۰/۴۷۹	۲۵۰
۱۹/۲	۳/۶۰	۰/۶	۳۰۰

۳-۳- بررسی سختی

شکل (۷)، نمودار سختی نمونه‌های آستمپر شده در دمای ۲۵۰ °C را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود با افزایش زمان آستمپرینگ، سختی ماده یک روند افزایشی را نشان داد. با توجه به مطالبی که در بخش ۳-۱ راجع به افزایش درصد فریت بینیتی ارائه شد، با گذشت زمان (تا ۳۰ ساعت) تاثیر این افزایش میزان فریت بینیتی مشهود است. به طوری که با گذشت زمان آستمپر در دمای ثابت (۲۵۰ °C) سختی نمونه‌ها هم افزایش می‌یابد. موضوع دیگری که باید در نظر گرفته شود تشکیل کاربیدهای انتقالی و یا تشکیل سمنتیت با گذشت زمان است. از آن‌جا که کاربیدهای انتقالی قابل تشکیل در این آلیاژ در مقیاس نانومتری هستند، با توجه به بررسی‌های انجام شده در سایر تحقیقات-بررسی‌های متالوگرافی انجام گرفته توسط میکروسکوپ الکترونی گسیل میدان، توانایی شناسایی آن‌ها را ندارد و در صورت وجود هم برای تشخیص آن‌ها نیاز به بزرگ‌نمایی بالاتر و میکروسکوپ الکترونی عبوری است. به طور مثال گارسیا-متو و همکاران [۱۷] روی فولادی با ۳ درصد وزنی سیلیسیم کار کردند و آلیاژی کاملاً دوفازی شامل فریت بینیتی و آستنیت باقی-مانده را بدون هیچ اثری از سمنتیت تولید کردند. هم‌چنین در آلیاژی نسبتاً مشابه با آلیاژ مورد تحقیق حتی با درصد سیلیسیم کمتر و در زمان‌های بسیار طولانی آستمپرینگ اثری از رسوبات سمنتیت دیده نشده است [۱۸]. پس می‌توان گفت که دلیل افزایش سختی، کاهش ضخامت فریت بینیتی است و افزایش فصل مشترک دو فاز موجود است. گذشته از این موضوع، افزایش زمان آستمپرینگ باعث افزایش درصد فریت بینیتی شده و این خود دلیل دیگری بر افزایش سختی نمونه‌ها است. یعنی علاوه بر ضخامت صفحات فریت بینیتی، افزایش مقدار آن هم نقش مهمی در افزایش سختی دارد. این مورد با مطالب گفته شده در بخش ۳-۱ مطابقت دارد.

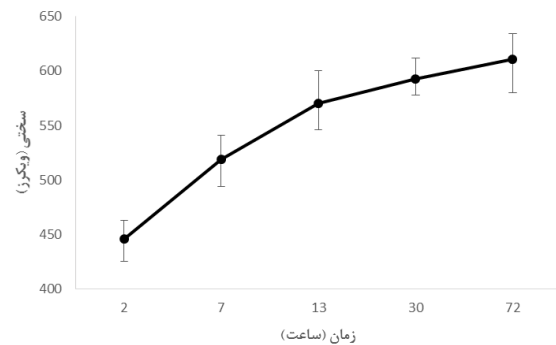
سختی نمونه‌های آستمپر شده در دمای ۳۰۰ °C در شکل (۸)، قابل مشاهده است. از شکل پیدا است که برای این نمونه هم روندی مشابه نمونه‌ی ۲۵۰ °C اتفاق افتاده است و می‌توان نتیجه گرفت که مکانیزم مشابهی برای افزایش سختی در نمونه‌ی ۳۰۰ °C وجود دارد. با بررسی عکس‌های میکروسکوپ نوری و الکترونی گسیل میدانی هم این مطلب به اثبات رسید.

مشاهده می‌شود، بلوک‌های آستنیت باقی‌مانده در شکل نشان داده شده است. این بلوک‌ها با گذشت زمان آستمپر ریزتر شده و اثر خیلی کمی از آنها دیده شد.

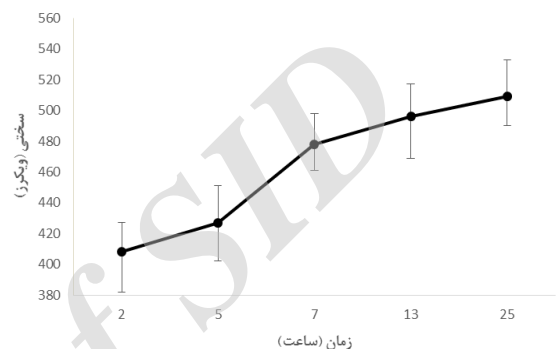


شکل ۹- ریزساختار نمونه آستمپر شده در دمای 250°C و زمان (الف) ۵ ساعت و (ب) ۷ ساعت.

برای این آلیاژ امکان افزایش سختی با تشکیل مارتنزیت بعد از آبدادن در انتهای عملیات آستمپرینگ نیز محتمل است. با بررسی نمونه‌ها در زمان‌های مورد بحث در دمای 300°C مارتنزیت تشکیل نشد؛ که دلایل آن می‌تواند به این صورت باشد: اول اینکه بعد از گذشت ۵ ساعت مقدار قابل توجهی فریت بینیتی تشکیل شده است و مقدار کمی آستنیت برای تشکیل مارتنزیت وجود دارد. همچنین به واسطه‌ی تشکیل فریت، کربن به آستنیت پس زده شده و درصد کربن آن زیاد شده و از آنجا که افزایش کربن باعث افت دمای M_s می‌شود، احتمال تشکیل مارتنزیت در



شکل ۷- تغییرات سختی بر حسب زمان آستمپرینگ در 250°C بر حسب زمان آستمپرینگ.



شکل ۸- تغییرات سختی بر حسب زمان آستمپرینگ در 300°C بر حسب زمان آستمپرینگ.

موضوع دیگری که باید بررسی شود، جهش نمودار از نمونه‌ی ۲ (۵ ساعت آستمپر شده) به ۳ (۷ ساعت آستمپر شده) است. در این بازه اختلافی در حدود ۵۰ ویکرز وجود دارد و دلیل این اختلاف این است که، در دمای یاد شده و بین زمان‌های آستمپر ۵ تا ۷ ساعت درصد قابل توجهی از آستنیت تحت دگرگونی قرار گرفته و فریت بینیتی بیشتری تشکیل شده است که این مقدار در دو نمونه تفاوت قابل توجهی داشته و باعث جهش در میزان سختی نمونه‌ها شده است. البته این موضوع نیاز به بررسی دقیق‌تر توسط الگوهای اشعه‌ی داشت که با بررسی آن‌ها مشخص شد که مطلب فوق و استدلال بیان شده تاحدی درست است. همچنین با مطالعه‌ی بیشتر عکس‌های میکروسکوپ نوری مشاهده شد که علاوه بر افزایش کسر حجمی فریت بینیتی که توسط XRD بدست آمد، ضخامت صفحات آن نیز به طور قابل توجهی کم شده و بلوک‌های آستنیت باقی‌مانده تقریباً به طور کامل جای خود را به لایه‌های ریز آن داده است. در شکل (۹)، تصاویر ریزساختاری مربوط به نمونه‌های آستمپر شده در دمای 300°C و زمان‌های ۵ و ۷ ساعت ارائه شده است. همانطور که در شکل (۹-الف)

- [۷] گلغزار م.، اصول و کاربرد عملیات حرارتی فولادها، انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان، چاپ دوم، ۱۳۷۹.
- [8] Bhadeshia H.K.D.H., Christian J., Bainite in steels, Metallurgical transactions A, 1990, 21(3) 767-797.
- [9] Bhadeshia H.K.D.H., Garcia-Mateo C., Brown P., Bainite steel and methods of manufacture thereof, ed: Google Patents, 2015.
- [10] Porter D.A., Easterling K.E., Sherif M., Phase Transformations in Metals and Alloys, (Revised Reprint), CRC press, 2009.
- [11] Caballero F., Garcia-Mateo C., The Processing of Nanocrystalline Steels by Solid Reaction, Chapter 4 in Nanostructured Metals and Alloys, Woodhead Publishing Series in Metals and Surface, 2011, 85-117.
- [12] <https://www.phasetrans.msm.cam.ac.uk/map/steel/programs/mucg83.html>
- [13] ASM Handbook "Properties and Selection: Irons, Steels, and High-performance Alloys", ASM International, 2001.
- [14] Matsuda H., Bhadeshia H.K., Kinetics of the bainite transformation, in Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2004, 460(2046) 1707-1722:
- [15] Singh S., Bhadeshia H., Estimation of bainite plate-thickness in low-alloy steels, Materials Science and Engineering: A, 1998, 245(1) 72-79.
- [16] Garcia-Mateo C., Caballero F.G., Bhadeshia H.K.D.H., Development of hard bainite, ISIJ international, 2003, 43(8) 1238-1243.
- [17] Garcia-Mateo C., Caballero F.G., Sourmail T., Kuntz M., Cornide J., Smanio V., Elvira R., Tensile behaviour of a nanocrystalline bainitic steel containing 3wt% silicon, Materials Science and Engineering: A, 2012, 549, 185-192.
- [18] Garcia-Mateo C., Caballero F.G., Bhadeshia H.K.D.H., Acceleration of low-temperature bainite, ISIJ international, 2003, 43(11) 1821-1825.

ساختار کم می‌شود. با محاسبات انجام شده توسط مدل ترمودینامیکی MUCG83 دمای تشکیل مارتنزیت در زمان ۷ ساعت، حدود 10°C بدست آمد که با توجه به کوئچ کردن آلیاژ در آب با دمای 25°C ، احتمالاً امکان تشکیل مارتنزیت وجود نداشته است. این موضوع پیش‌تر با توجه به الگوهای XRD نمونه‌ها اثبات شده بود.

۴- نتیجه‌گیری

تاثیر دما و زمان عملیات حرارتی آستمپرینگ بر خواص مکانیکی و ریزساختار آلیاژ مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر حاصل شد:

- ۱- با کاهش دمای عملیات حرارتی آستمپرینگ، میزان فاز محصول در ریزساختار یعنی فریت بینیتی، به دلیل افزایش نیروی محرکه جوانه‌زنی، بیشتر می‌شود.
- ۲- افزایش زمان عملیات حرارتی آستمپرینگ باعث ظرفیت شدن ساختار (کاهش ضخامت صفحات فریت بینیتی) و کاهش مقدار آستنیت می‌شود.
- ۳- کاهش دمای عملیات حرارتی آستمپرینگ سبب ریزتر شدن صفحات فریت بینیتی تا 60 nm می‌شود.
- ۴- با زیاد شدن زمان عملیات حرارتی آستمپرینگ به دلیل افزایش درصد فریت بینیتی و کاهش ضخامت آن سختی تا حدود 600 HV افزایش می‌یابد.

مراجع

- [1] Caballero F., Miller M.K., Garcia-Mateo C., Capdevila C., De Andrés C.G., Phase transformation theory: a powerful tool for the design of advanced steels, Journal of Metals, 2008, 60(12) 16-21.
- [2] Hanzaki A.Z., PD H., Yue S., The influence of bainite on retained austenite characteristics in Si-Mn TRIP steels, ISIJ international, 1995, 35(1) 79-85.
- [3] Sugimoto K.I., Usui N., Kobayashi M., Hashimoto S.I., Effects of volume fraction and stability of retained austenite on ductility of TRIP-aided dual-phase steels, ISIJ international, 1992, 32(12) 1311-1318.
- [4] Qian L., Zhou Q., Zhang F., Meng J., Zhang M., Tian Y., Microstructure and mechanical properties of a low carbon carbide-free bainitic steel co-alloyed with Al and Si, Materials & Design, 2012, 39, 264-268.
- [5] Caballero F.G., Miller M.K., Babu S.S., Garcia-Mateo C., Atomic scale observations of bainite transformation in a high carbon high silicon steel, Acta Materialia, 2007, 55(1) 381-390.
- [6] Soliman M., Palkowski H., Ultra-fine bainite structure in hypo-eutectoid steels, ISIJ international, 2007, 47(12) 1703-1710.